

---

---

# ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ИНФОРМАТИКИ

---

## THEORETICAL FOUNDATIONS OF COMPUTER SCIENCE

---

---

УДК 004.93'1;932

### ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДИКИ ГИСТОГРАММ НАПРАВЛЕННЫХ ГРАДИЕНТОВ ДЛЯ КЛАССИФИКАЦИИ ДАКТИЛОСКОПИЧЕСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

В. А. КУЛИНКОВИЧ<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Белорусский государственный университет,  
пр. Независимости, 4, 220030, г. Минск, Республика Беларусь

Предложен метод классификации дактилоскопических изображений, который может найти применение в различных задачах идентификации и биометрического анализа. Выведены закономерности зависимости типа папиллярного узора от распределения локальных направлений. Рассмотрены два подхода к анализу эффективности предложенного метода: непосредственно реализация и искусственная нейронная сеть. Теоретически и экспериментально доказано, что гистограмма распределения направлений имеет различные характеристики для дактилоскопических изображений с различными типами узоров. Приводятся результаты численных экспериментов, подтверждающие теоретические выводы и доказывающие эффективность предложенного алгоритма.

**Ключевые слова:** дактилоскопическое изображение; классификация; локальное направление; поле направлений; гистограмма; нейронная сеть.

---

#### Образец цитирования:

Куликович В. А. Применение методики гистограмм направленных градиентов для классификации дактилоскопических изображений // Журн. Белорус. гос. ун-та. Математика. Информатика. 2017. № 1. С. 53–60.

#### For citation:

Kulinkovich V. A. Using histogram of oriented gradients for fingerprint classification. *J. Belarus. State Univ. Math. Inform.* 2017. No. 1. P. 53–60 (in Russ.).

---

#### Автор:

**Виктория Александровна Куликович** – старший преподаватель кафедры компьютерных технологий и систем факультета прикладной математики и информатики.

#### Author:

**Viktoryia Kulinkovich**, senior lecturer at the department of computer applications and systems, faculty of applied mathematics and computer sciences.  
*kulinkovichva@gmail.com*

## USING HISTOGRAM OF ORIENTED GRADIENTS FOR FINGERPRINT CLASSIFICATION

V. A. KULINKOVICH<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Belarusian State University,  
Nezavisimosti avenue, 4, 220030, Minsk, Republic of Belarus

This article proposes method for classifying fingerprints. The proposed method can be used for fingerprint identification and biometric analysis. Article describes correlations between fingertip patterns and local area gradient orientation distribution. Method effectiveness is analyzed using two approaches: with simple implementation and with artificial neural network. Theoretical and experimental research proves that the orientation histogram has different characteristics for fingerprints containing different types of patterns. The results of numerical experiments confirm the theoretical conclusions and prove the efficiency of the proposed algorithm.

**Key words:** fingerprint; classification; local orientation; orientation field; histogram; neural network.

### Введение

Классификация дактилоскопических изображений является неотъемлемой составляющей в задачах идентификации по отпечаткам пальцев. Определение типа узора на первоначальном этапе идентификации позволяет сузить область поиска, что значительно снижает вычислительные и временные затраты. Для биометрического анализа классификация дактилоскопических изображений также играет немаловажную роль – определение типа узора позволяет провести дальнейшую оценку и получить необходимую биометрическую информацию. В целом рассматриваемая задача классификации является достаточно сложной и трудоемкой, во-первых, в связи с достаточно большим разнообразием структур папиллярных линий, а во-вторых, из-за наличия всевозможных дефектов и искажений на дактилоскопическом изображении, получаемых при сканировании.

Цель работы – исследование базовой классификации папиллярных узоров – арки, треугольной арки, петли (правая, левая), завитка [1; 2]. Предлагаемый метод классификации основан на построении и анализе гистограммы распределения направлений папиллярных линий на дактилоскопическом изображении. Результаты численных экспериментов подтверждают надежность данной методики.

### Гистограмма направленных градиентов

Гистограмма направленных градиентов (англ. Histogram of Oriented Gradients, HOG) – это методика, используемая в компьютерном зрении и обработке изображений в целях распознавания объектов [3; 4]. Данный подход основан на подсчете направлений градиента яркости (интенсивности) в локальных областях изображения и базируется на том факте, что распределение градиентов яркости на каком-либо участке изображения дает представление о внешнем виде и форме объекта, расположенного на этом участке (даже без учета точного расположения этих направлений). Суть метода состоит в том, что изображение плотной равномерной сеткой разбивается на области, для каждой из которых строится локальная гистограмма направлений градиентов яркости. Для обеспечения инвариантности по отношению к освещению гистограммы подвергаются нормализации по контрасту с мерой яркости, вычисленной по большему фрагменту. Совокупность построенных нормализованных гистограмм будет являться дескриптором объекта. Такие дескрипторы инвариантны к освещению, геометрическим и фотометрическим преобразованиям (за исключением ориентации самого объекта). Последним этапом в распознавании является классификация дескрипторов при помощи обучения с учителем.

### Применение методики HOG к классификации дактилоскопических изображений

Рассматриваемый подход к классификации дактилоскопических изображений основан на анализе гистограммы распределения направлений на поле направлений, которое является одной из основных характеристик дактилоскопического изображения и представляет собой локальную ориентацию папиллярных линий. Существует большое количество алгоритмов для построения поля направлений [5; 6], среди которых одним из наиболее популярных является метод, основанный на вычислении градиентных характеристик изображения. В данном случае используется метод построения сглаженного поля направлений из [7].

### Используемые обозначения

Для классифицируемого дактилоскопического изображения рассматривается блочное дискретное поле направлений  $\hat{D}_s = \{\hat{d}_s(m_s, n_s)\}_{(m_s, n_s) \in M_s \cdot N_s}$ , где  $\hat{d}_s(m_s, n_s) \in \{1, \dots, 8\}$  – одно из восьми дискретных направлений в блоке с центром в точке  $(m_s, n_s)$ , которое соответствует преобладающей в данном блоке ориентации папиллярных линий. Направление  $d_s = 1$  соответствует диапазону  $\left[\frac{\pi}{16}; \frac{3\pi}{16}\right)$ , направление  $d_s = 2$  – диапазону  $\left[\frac{3\pi}{16}; \frac{5\pi}{16}\right)$  и т. д. (угол отсчитывается от отрицательного направления оси  $Ox$ ). В точках фона и точках, где направление оказывается неопределенным (модуль градиента равен либо близок к нулю), полагаем, что дискретное направление равно нулю [7].

Гистограмма распределения направлений строится по формуле

$$H(d_s) = \sum_{m, n} \xi(m, n), \quad d_s = \overline{1, 8},$$

где  $\xi(m, n)$  – двузначный признак, принимающий единичное значение, если направление в точке  $(m, n)$  совпадает с  $d_s$ .

### Анализ гистограммы распределения направлений для различных типов папиллярных узоров

Если имеет место арочный тип узора, папиллярные линии пересекают пальцевую подушечку в горизонтальном направлении от одного края к другому, слегка изгибаясь в центре. В случае такой структуры узора на гистограмме распределения направлений преобладают направления, близкие к горизонтальному. При этом вертикальное направление и близкие к нему ( $d_s = 3; 4; 5$ ) либо отсутствуют, либо будут представлены весьма незначительными значениями (рис. 1).

Для треугольной арки характерна схожая конфигурация. Отличие состоит в том, что при прежнем горизонтальном преобладании папиллярные линии в центре имеют восходящую направленность, что обеспечивает наличие одной особой точки – дельты. На гистограмме при таком типе узора будут в незначительной степени присутствовать направления, близкие к вертикальному ( $d_s = 3; 4; 5$ ) (рис. 2).

Петля представляет собой полузамкнутый узор, папиллярные линии в котором, начинаясь от одного края пальцевой подушечки, изгибаются в сторону центра, огибают его и возвращаются к тому краю, с которого начались. Такая структура характеризуется наличием ярко выраженного направления, что делает гистограмму распределения направлений унимодальной, причем положение пика дает представление о подтипе петли (правая или левая). Все восемь дискретных направлений с большой вероятностью будут присутствовать на гистограмме, при этом чаще всего существует второй локальный максимум, соответствующий направлению, ортогональному преимущественному либо соседнему с ним (рис. 3).

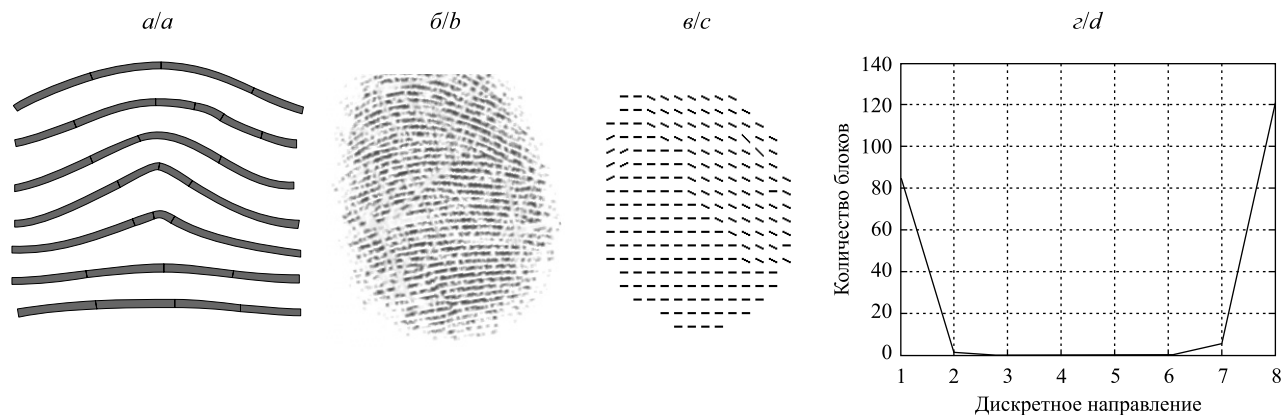


Рис. 1. Гистограмма распределения направлений для папиллярного узора арочного типа:  
а – схематичное изображение узора; б – дактилоскопическое изображение с папиллярным узором арочного типа;  
в – сглаженное поле направлений; г – гистограмма распределения направлений

Fig. 1. Orientation histogram for fingerprint with «arch» pattern:  
а – schematic image of pattern; б – fingerprint with «arch» pattern;  
с – fingerprint orientation field; д – orientation histogram

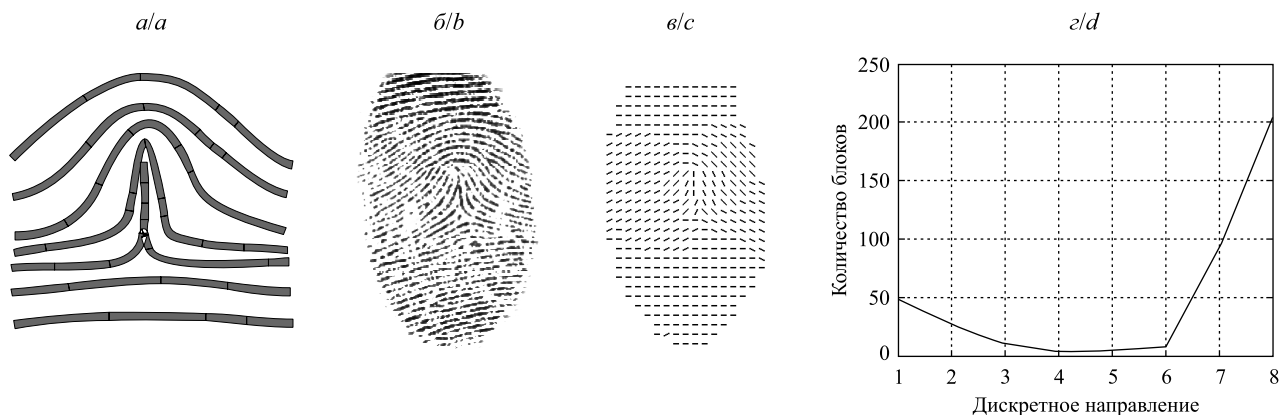


Рис. 2. Гистограмма распределения направлений для папиллярного узора типа «треугольная арка»:  
*a* – схематичное изображение узора; *б* – дактилоскопическое изображение с папиллярным узором типа «треугольная арка»;  
*в* – сглаженное поле направлений; *г* – гистограмма распределения направлений  
 Fig. 2. Orientation histogram for fingerprint with «tented arch» pattern:  
*a* – schematic image of pattern; *b* – fingerprint with «tented arch» pattern;  
*c* – fingerprint orientation field; *d* – orientation histogram

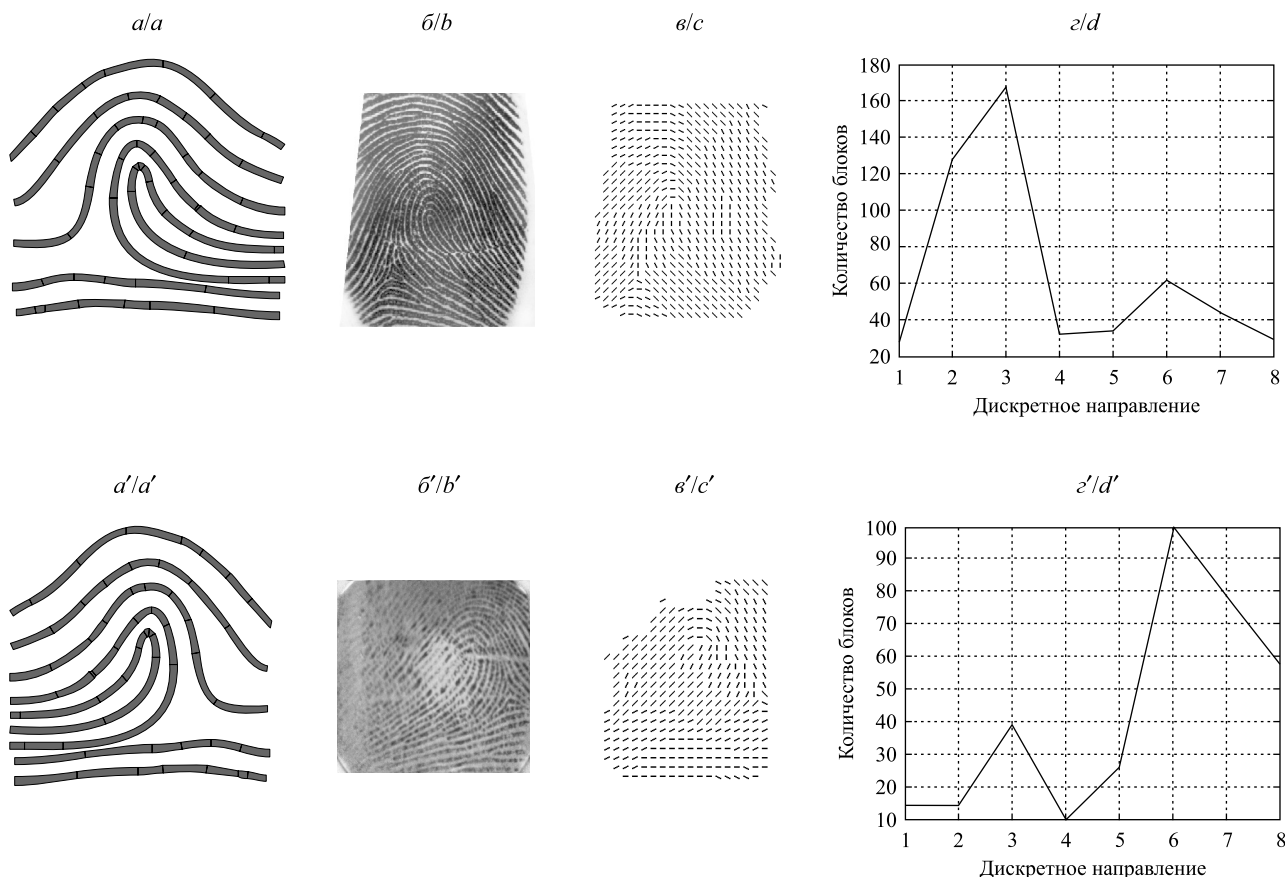


Рис. 3. Гистограмма распределения направлений для папиллярного узора типа «петля»:  
*a* – схематичное изображение узора типа «правая петля»;  
*a'* – схематичное изображение узора типа «левая петля»;  
*б* – дактилоскопическое изображение с папиллярным узором типа «правая петля»;  
*б'* – дактилоскопическое изображение с папиллярным узором типа «левая петля»;  
*в, в'* – сглаженное поле направлений; *г, г'* – гистограмма распределения направлений  
 Fig. 3. Orientation histogram for fingerprint with «loop» pattern:  
*a* – schematic image of pattern with «right loop»; *a'* – schematic image of pattern with «left loop»;  
*b* – fingerprint with «right loop» pattern; *b'* – fingerprint with «left loop» pattern;  
*c, c'* – fingerprint orientation field; *d, d'* – orientation histogram

При типе узора «завиток» папиллярные линии в центральной части образуют замкнутый контур. Такой тип узора имеет две дельты и одно либо два ядра. Объем и форма могут сильно варьироваться. При различных формах узора (кольцевая, эллипсоидная, спиральная) возможны следующие характеристики гистограмм: гистограмма имеет унимодальный характер, однако в отличие от петлевого типа пик преимущественно попадает на центральную часть гистограммы (на направления  $d_s = 3; 4; 5$  соответственно), при этом локальные максимумы отсутствуют; на гистограмме равномерно представлены все восемь дискретных направлений; гистограмма является бимодальной (рис. 4).

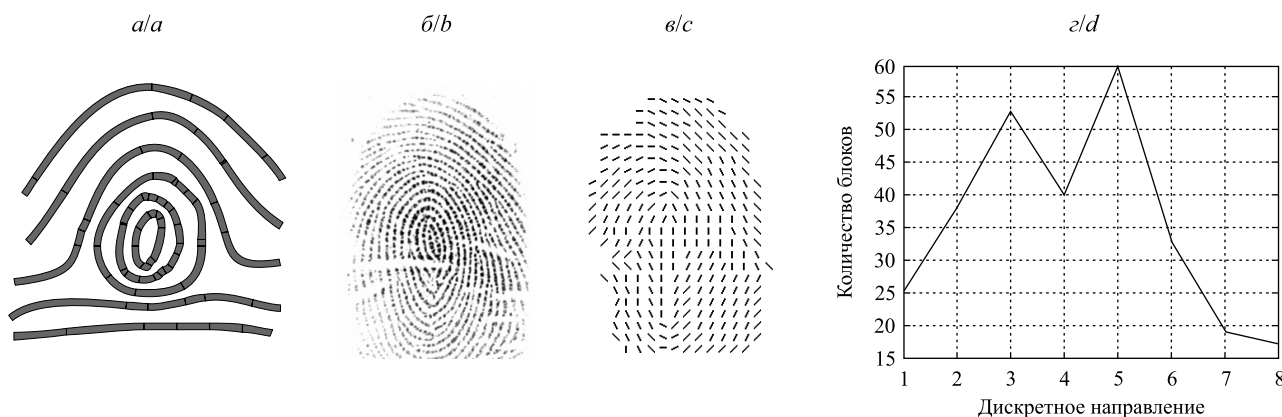


Рис. 4. Гистограмма распределенных направлений для папиллярного узора типа «завиток»:  $a$  – схематичное изображение узора;  $b$  – дактилоскопическое изображение с папиллярным узором типа «завиток»;  $в$  – сглаженное поле направлений;  $г$  – гистограмма распределения направлений

Fig. 4. Orientation histogram for fingerprint with «whorl» pattern:  $a$  – schematic image of pattern;  $b$  – fingerprint with «whorl» pattern;  $c$  – fingerprint orientation field;  $d$  – orientation histogram

Следует отметить, что все вышеперечисленные закономерности справедливы для случая идеального геометрического расположения отпечатка, т. е. даже небольшие повороты могут привести к значительному искажению результата (допустимы повороты менее чем на угол, равный  $\frac{\pi}{16}$ , что составляет половину дискрета при разбиении на восемь направлений). Поэтому при использовании данной методики делаются следующие допущения:

- изображение горизонтально ориентированное, т. е. предполагается, что при сканировании пальцевой подушечки не допускались отклонения от вертикального положения пальца;
- информативная часть папиллярного узора (т. е. содержащая особые точки – дельты и ядра) занимает большую часть сканируемого изображения.

### Численные эксперименты

На основании выведенных закономерностей была разработана программа-классификатор, получающая на вход дактилоскопическое изображение и возвращающая вероятности принадлежности данного изображения к одному из пяти стандартных типов. Схема работы программы-классификатора следующая: для входного изображения строится усредненное поле направлений по блокам размером  $13 \times 13$  точек по методу [7], после чего формируется гистограмма распределения направлений. Затем по полученным значениям гистограммы формируется вектор признаков, компоненты которого соответствуют ключевым характеристикам гистограммы, обозначенным выше (количество пиков, значения локальных максимумов и минимумов, их взаимное расположение и т. д.). В соответствии со значением каждой из компонент вектора признаков меняется вероятность принадлежности гистограммы к одному из определяемых типов. Результатом работы классификатора является вектор из пяти значений в диапазоне от 0 до 1, определяющий итоговые вероятности принадлежности гистограммы к одному из типов узора (1 – арка, 2 – треугольная арка, 3 – левая петля, 4 – правая петля, 5 – завиток). Все формируемые признаки, а также соответствующие им изменения вероятностей были определены эмпирически на основании многочисленных наблюдений.

Примеры работы классификатора представлены на рис. 5: вероятность принадлежности к одному из типов равна единице (см. рис. 5,  $a$ ); вероятность принадлежности к одному из типов меньше единицы (см. рис. 5,  $b$ ); неверное определение типа узора (см. рис. 5,  $в$ ).



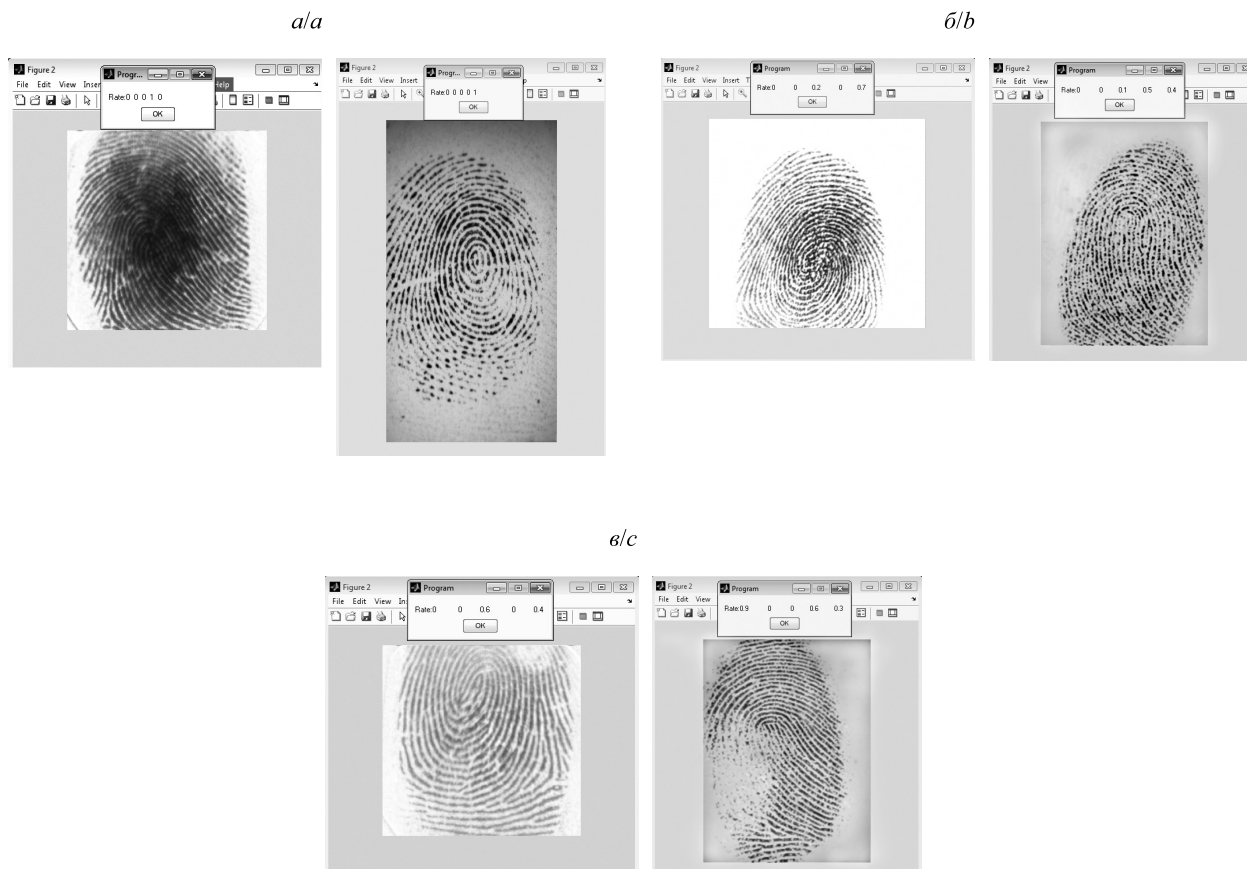


Рис. 5. Результаты классификации:  
*a* – точная; *b* – частично точная; *в* – ошибочная  
Fig. 5. Classification results:  
*a* – accurate; *b* – partially accurate; *c* – inaccurate

Для исследования точности работы классификатора была сформирована тестовая выборка из баз FVC2000, FVC2002, FVC2004 [8]. Из этой выборки на основании визуального анализа отброшены заведомо неподходящие изображения, не удовлетворяющие вышеуказанным требованиям. Из тестовой выборки 81 % изображений были успешно классифицированы.

### Использование нейросетевого аппроксиматора для классификации дактилоскопических изображений

Исследована также возможность применения нейросетевых методов для аппроксимации зависимостей между значениями гистограммы распределения направлений и типом узора на соответствующем дактилоскопическом изображении. В результате многочисленных экспериментов в качестве нейросетевого аппроксиматора была выбрана трехслойная однонаправленная нейронная сеть, обучаемая с применением алгоритма обратного распространения. Данная модель имеет восемь входов, соответствующих значениям гистограммы распределения направлений, и пять выходов, которые определяют вероятность принадлежности входной гистограммы к одному из вышеперечисленных классов. Количество нейронов скрытого слоя варьируется в зависимости от размера обучающей выборки таким образом, чтобы число весовых коэффициентов не превышало количества примеров для обучения; в качестве активационных функций выбраны гиперболический тангенс для входного слоя и линейные функции активации для скрытого и выходного слоев. Перед созданием и обучением сети выполняется нормирование входных данных. Схема работы нейронной сети представлена на рис. 6.

Обучающая и тестовая выборки формируются из дактилоскопических изображений FVC2000, FVC2002, FVC2004 [8]. Пользователям в свободном доступе предоставлены по четыре множества во всех базах, содержащих изображения, полученные с помощью разного типа датчиков. В каждом из этих множеств содержатся 80 изображений – десять пальцевых подушечек, отсканированных в восьми вариациях.

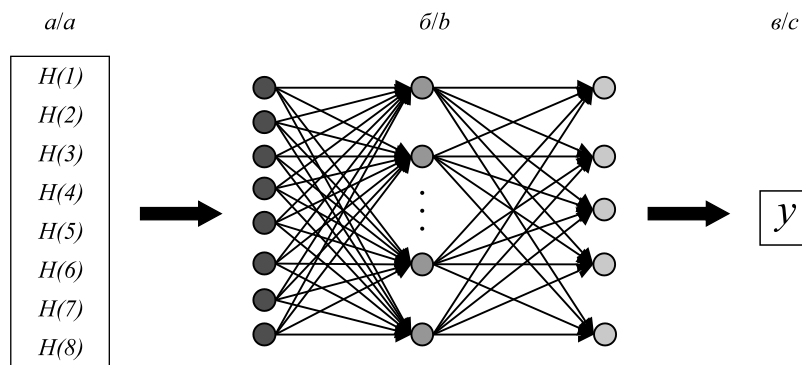


Рис. 6. Схема работы нейронной сети:  
*a* – входы нейронной сети; *б* – структура нейронной сети;  
*в* – выход нейронной сети  
 Fig. 6. Neural network graph:  
*a* – neural network inputs; *b* – neural network structure;  
*c* – neural network output

Наблюдения из обучающей выборки были классифицированы без ошибок. Результаты классификации при различных обучающих и тестовых множествах представлены в таблице.

**Точность классификации  
для различных обучающих и тестовых множеств**

Наименование показателя	База данных дактилоскопических изображений					
	FVC2000/DB1	FVC2000/DB1*	FVC2000/DB2	FVC2000/DB1 + + FVC2000/DB2	FVC2000/DB1 + + FVC2000/DB2**	FVC2000 + + FVC2002 + + FVC2004***
Размерность обучающей выборки/ тестовой выборки изображений	70/10	56/3	70/10	140/20	70/10	769/31
Точность классификации (усредненное значение), %	98,5	94	88	91,25	79	66

\* В тестовом множестве отсутствуют вариации отпечатков из обучающего множества.  
 \*\* Обучающая выборка сформирована из DB1, тестовая выборка – из DB2.  
 \*\*\* Низкая точность обусловлена большим разбросом значений входных данных.

С одной стороны, обучающая выборка должна быть репрезентативной и содержать достаточное для качественного обучения количество примеров. С другой стороны, объем обучающей выборки должен быть минимально возможным в целях сокращения временных и вычислительных затрат. При наличии в обучающих и тестовых множествах вариаций одного и того же отпечатка точность классификации приближается к 100 % и такой результат не является показательным. В случае использования в качестве примеров изображений разных размеров и разрешений, полученных с помощью различных датчиков, точность значительно уменьшается.

**Заключение**

Предложенный метод позволяет достаточно точно классифицировать папиллярные узоры, однако его недостатком являются ограничения, накладываемые на классифицируемое изображение. Данную методику можно использовать в совокупности с другими алгоритмами для повышения точности классификации в задачах идентификации и биометрического анализа.

**Библиографические ссылки**

1. Handbook of Fingerprint Recognition / D. Maltoni [et al.]. New York, 2003.
2. Гладкова Т. Д. Кожные узоры кисти и стопы обезьян и человека. М., 1966.
3. Dalal N., Triggs B. Histograms of oriented gradients for human detection // Computer Vision and Pattern Recognition : IEEE Comput. Soc. Conf. (San Diego, 20–25 June, 2005). San Diego, 2005. Vol. 1. P. 886–893.

4. Гистограмма направленных градиентов [Электронный ресурс]. 2010. URL: <http://dic.academic.ru/dic.nsf/ruwiki/1700368> (дата обращения: 05.04.2016).
5. Kass M., Witkin A. Analyzing oriented pattern // *Comput. Vis., Graph., Image Process.* 1987. Vol. 37, issue 3. P. 362–397.
6. Zhou J., Gu J. A model-based method for the computation of fingerprints orientation field // *IEEE Trans. Image Process.* 2004. Vol. 13, issue 6. P. 821–835.
7. Селянинов М. Ю., Куликович В. А. Построение поля направлений папиллярных линий дактилоскопических отпечатков в системах биометрического анализа // *Электроника инфо.* 2015. № 9(123). С. 56–59.
8. Fingerprint verification Competition 2004 [Electronic resource]. 2004. URL: <http://bias.csr.unibo.it/fvc2004> (date of access: 29.07.2016).

## References

1. Maltoni D., Maio D., Jain A. K., et al. Handbook of Fingerprint Recognition. New York, 2003.
2. Gladkova T. D. Kozhnye uzory kisti i stopy obez'yan i cheloveka [Skin Patterns of Hand and Foot in Monkeys and Humans]. Moscow, 1966 (in Russ.).
3. Dalal N., Triggs B. Histograms of oriented gradients for human detection. *Computer Vision and Pattern Recognition* : IEEE Comput. Soc. Conf. (San Diego, 20–25 June, 2005). San Diego, 2005. Vol. 1. P. 886–893.
4. Gistogramma napravlennykh gradientov [Histogram of oriented gradients] [Electronic resource]. 2010. URL: <http://dic.academic.ru/dic.nsf/ruwiki/1700368> (date of access: 05.04.2016) (in Russ.).
5. Kass M., Witkin A. Analyzing oriented pattern. *Comput. Vis., Graph., Image Process.* 1987. Vol. 37, issue 3. P. 362–397.
6. Zhou J., Gu J. A model-based method for the computation of fingerprints orientation field. *IEEE Trans. Image Process.* 2004. Vol. 13, issue 6. P. 821–835.
7. Selyaninov M. Y., Kulinkovich V. A. Postroenie polya napravlenii papillyarnykh linii daktiloskopicheskikh otpechatkov v sistemakh biometricheskogo analiza [Computation of fingerprints orientation field in biometric systems]. *Elektronika info.* 2015. No. 9(123). P. 56–59 (in Russ.).
8. Fingerprint verification Competition 2004 [Electronic resource]. 2004. URL: <http://bias.csr.unibo.it/fvc2004> (date of access: 29.07.2016).

Статья поступила в редакцию 23.09.2016.  
Received by editorial board 23.09.2016.